



TUGAS AKHIR – SS141501

OPTIMASI WAKTU PENGGANTIAN KOMPONEN
RODA LOKOMOTIF SERI CC DI DIPO LOKOMOTIF SIDOTOPO
PT. KERETA API INDONESIA (PERSERO)
MENGUNAKAN METODE *POWER LAW PROCESS*

SINTA SEPTI PANGASTUTI

NRP 1314 105 011

Dosen Pembimbing
Drs. Haryono, M.Sc
Diaz Fitra Aksioma, M.Si

PROGRAM STUDI S1
JURUSAN STATISTIKA
FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER
SURABAYA 2016



FINAL PROJECT – SS141501

OPTIMIZATION TIME REPLACEMENT FOR CC LOCOMOTIVE
WHEEL USING POWER LAW PROCESS IN DIPO LOCOMOTIVE
SIDOTOPO PT. KERETA API INDONESIA (PERSERO)

SINTA SEPTI PANGASTUTI

NRP 1314 105 011

Supervisor
Drs. Haryono, M.Sc
Diaz Fitra Aksioma, M.Si

UNDERGRADUATE PROGRAMME
DEPARTMENT OF STATISTICS
FACULTY OF MATHEMATICS AND NATURAL SCIENCE
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER
SURABAYA 2016

LEMBAR PENGESAHAN

**OPTIMASI WAKTU PENGANTIAN KOMPONEN RODA
LOKOMOTIF SERI CC DI DIPO LOKOMOTIF SIDOTOPO
PT. KERETA API INDONESIA (PERSERO)
MENGUNAKAN METODE *POWER LAW PROCESS***

TUGAS AKHIR

Diajukan untuk Memenuhi Salah Satu Syarat
Memperoleh Gelar Sarjana Sains
pada
Program Studi S-1 Jurusan Statistika
Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh :

SINTA SEPTI PANGASTUTI
NRP. 1314105011

Disetujui oleh Pembimbing Tugas Akhir

Drs. Haryono, M.Sc.

NIP : 19520910 197901 1 001

Diaz Fitra Aksioma, M.Si.

NIP : 19870602 201212 2 002

Mengetahui,

Ketua Jurusan Statistika FMIPA-ITS

Dr. Suhartono

NIP : 19710929 199512 1 001

SURABAYA, JULI 2016

**OPTIMASI WAKTU PENGANTIAN KOMPONEN RODA
LOKOMOTIF SERI CC DI DIPO LOKOMOTIF SIDOTOPO
PT. KERETA API INDONESIA (PERSERO)
MENGUNAKAN METODE *POWER LAW PROCESS***

Nama Mahasiswa : Sinta Septi Pangastuti
NRP : 1314 105 011
Jurusan : Statistika FMIPA-ITS
Dosen Pembimbing : Drs. Haryono, M.Sc
Co. Pembimbing : Diaz Fitra Aksioma, M.Si

Abstrak

Moda transportasi darat yaitu kereta api saat ini berkembang pesat terutama di Pulau Jawa. Dengan meningkatnya jumlah pengguna jasa kereta api, maka perusahaan kereta api dituntut untuk semakin meningkatkan pelayanan serta keamanan. Seiring dengan tujuan perkeretaapian, maka perawatan lokomotif dilakukan di Dipo Lokomotif atau Balai Yasa milik PT Kereta Api Indonesia (Persero). Dipo Lokomotif Sidotopo merupakan bengkel tempat menyimpan, menyiapkan melakukan pemeriksaan, memelihara dan perbaikan ringan agar lokomotif siap untuk menarik rangkaian kereta api. Salah satu komponen yang penting dalam lokomotif adalah roda lokomotif. Perawatan yang dilakukan di Dipo Lokomotif sesuai dengan petunjuk Buku Panduan Manual milik PT Kereta Api Indonesia (Persero) yang dilakukan tanpa adanya penelitian lebih lanjut apakah waktu perawatan dan penggantian tersebut sudah optimal. Dalam penelitian kali ini akan digunakan metode untuk menentukan kebijakan perbaikan komponen roda lokomotif yaitu Power Law Process, yang menghasilkan keputusan pemeliharaan yang optimal berdasarkan biaya minimum pada saat komponen roda sudah beroperasi selama 923 hari atau ketika komponen sudah dilakukan preventive sebanyak 2 kali dengan biaya penggantian yang dikeluarkan sebesar Rp.10.098,- per lokomotif per hari. Berdasarkan perhitungan ini bagian pemeliharaan dapat mengambil keputusan secara tepat kapan akan dilakukan penggantian terhadap komponen roda lokomotif sehingga kerugian dapat dicegah.

Kata kunci : lifetime, Non-Homogen Poisson Process, Power Law Process, roda lokomotif

**OPTIMIZATION TIME REPLACEMENT FOR CC
LOCOMOTIVE WHEEL USING POWER LAW PROCESS
IN DIPO LOCOMOTIVE SIDOTOPO PT. KERETA API
INDONESIA (PERSERO)**

Name of Student : Sinta Septi Pangastuti
NRP : 1314 105 011
Department : Statistics
Supervisor : Drs. Haryono, M.Sc
Co. Supervisor : Diaz Fitra Aksioma, M.Si

Abstract

Land transport modes namely rail is now growing rapidly, especially in Java. With the increasing number of users of railway services, the railway company is required to further improve service and security. Dipo Locomotive Sidotopo a garage to store, prepare inspection, maintenance and minor repairs to be ready to pull the locomotive train series. One important component of the locomotive is the locomotive wheel. The treatment is carried out in accordance with the instructions dipo locomotive Handbook Manual PT Kereta Api Indonesia (Persero) is carried out without further research whether the maintenance time and replacement is optimal. In this research will be used for the improvement of methods Power Law Process to determine which component of locomotive wheel, which produces optimal maintenance decision based on the minimum cost at the time of wheel components has been operating for 923 days with the cost of Rp. 10.098,- per locomotive per day. Based on this calculation maintenance department can make decisions exactly when will be the locomotive wheels so that losses can be prevented.

Keywords : lifetime, locomotive wheel, Non-Homogen Poisson Process, Power Law Process

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	i
LEMBAR PENGESAHAN	v
ABSTRAK.....	vii
ABSTRACT	ix
KATA PENGANTAR.....	xi
DAFTAR ISI.....	xiii
DAFTAR GAMBAR.....	xvii
DAFTAR TABEL.....	xix
DAFTAR LAMPIRAN.....	xxi

BAB 1 PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusn Masalah.....	4
1.3 Tujuan Penelitian	5
1.4 Batasan Masalah	5
1.5 Manfaat Penelitian	5

BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA

2.1 <i>Stochastic Point Process</i>	7
2.2 <i>Poisson Process</i>	7
2.2.1 <i>Homogenous Poisson Process</i>	8
2.2.2 <i>Non-Homogenous Poisson Process</i>	8
2.3 <i>Power Law Process</i>	8
2.4 <i>Failure Truncated Data dan TimeTruncated Data</i>	9
2.5 Pengujian <i>Trend</i> dalam <i>Failure Rate</i>	10
2.6 Estimasi Parameter.....	12
2.6.1 <i>Maximum Likelihood Estimation (MLE)</i> untuk <i>Failure Truncated Data</i>	12
2.6.2 <i>Maximum Likelihood Estimation (MLE)</i> untuk <i>Time</i> <i>Truncated Data</i>	12
2.7 <i>Goodness of Fits Test</i>	13
2.8 Model Optimasi	13
2.9 Roda Lokomotif Kereta Api	15

BAB 3 METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Sumber Data dan Variabel Penelitian	19
3.2 Langkah Analisis	20

BAB 4 ANALISIS DAN PEMBAHASAN

4.1 Karakteristik Data <i>Lifetime</i> Komponen Roda Lokomotif Kereta Api Seri CC	25
4.1.1 Karakteristik <i>Failure Truncated Data Lifetime</i> Komponen Roda Lokomotif Kereta Api Seri CC	25
4.1.2 Karakteristik <i>Time Truncated Data Lifetime</i> Komponen Roda Lokomotif Kereta Api Seri CC	28
4.2 Pengujian Trend Dalam <i>Failure Rate</i> pada Data Data <i>Lifetime</i> Komponen Roda Lokomotif Kereta Api Seri CC ..	30
4.2.1 Pengujian Trend dalam Failure Rate untuk Failure Truncated Data	30
4.2.2 Pengujian Trend dalam Failure Rate untuk Time Truncated Data	31
4.3 Estimasi Parameter Data <i>Lifetime</i> Komponen Roda Lokomotif	32
4.3.1 Estimasi Parameter Data <i>Lifetime</i> Komponen Roda Lokomotif untuk Data <i>Time Truncated</i>	32
4.4 <i>Goodness of Fits Test</i>	33
4.4.1 <i>Goodness of Fits Test</i> untuk <i>Time Truncated Data</i>	33
4.5 <i>Replacement Model</i>	35
4.5.1 Nilai <i>cf</i> dan <i>cp</i>	35
4.5.1 Perhitungan Estimasi biaya Penggantian Komponen Roda Lokomotif seri CC2017706	36

BAB 5 KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan	41
5.2 Saran	41

DAFTAR PUSTAKA.....	43
LAMPIRAN.....	45
BIODATA PENULIS.....	57

DAFTAR TABEL

Tabel 3.1 Struktur Data.....	20
Tabel 4.1 Statistika Deskriptif <i>Lifetime</i> (Hari) Komponen Roda Lokomotif Seri CC data <i>Failure Truncated</i>	26
Tabel 4.2 Statistika Deskriptif <i>Lifetime</i> (Hari) Komponen Roda Lokomotif Seri CC data <i>Time Truncated</i>	29
Tabel 4.3 <i>Laplace's Test</i> untuk <i>Failure Truncated Data</i>	31
Tabel 4.4 <i>Laplace's Test</i> untuk <i>Time Truncated Data</i>	32
Tabel 4.5 Estimasi Parameter <i>Time Truncated Data</i>	33
Tabel 4.6 <i>Rate of Occurance of Failure</i> (ROCOF) Roda Lokomotif Seri CC2017706.....	35
Tabel 4.7 Nilai c_p (<i>Cost of Preventive</i>)	36
Tabel 4.8 Nilai c_f (<i>Cost of Failure</i>)	37
Tabel 4.9 Ekspektasi Biaya (Ribuan Rupiah) untuk Penggantian Komponen roda Lokomotif Seri CC2017706	38

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Bagian-bagian Roda	17
Gambar 3.1 Macam-macam Cacat pada Roda.....	19
Gambar 3.2 Diagram Alir Penelitian	23
Gambar 4.1 Plot Perbandingan Jumlah Kerusakan (N) dengan Waktu Kumulatif untuk Roda Lokomotif.....	28
Gambar 4.2 Plot Perbandingan Jumlah <i>Kerusakan</i> (N) dengan Waktu Kumulatif untuk Roda Lokomotif.....	30
Gambar 4.3 <i>Rate of Occurance of Failure</i> (ROCOF) dari Roda Lokomotif CC2017706.....	36
Gambar 4.4 Ekspektasi Optimasi Biaya Komponen Roda Lokomotif Seri CC2017706 Terhadap Sepasang <i>T</i> dan <i>N</i>	39

DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1A	Failure Truncated Data CC2017703	45
Lampiran 1B	Failure Truncated Data CC2017711	45
Lampiran 1C	Failure Truncated Data CC2017713	45
Lampiran 1D	Failure Truncated Data CC2017718	45
Lampiran 1E	Failure Truncated Data CC2017719	46
Lampiran 1F	Failure Truncated Data CC2018348	46
Lampiran 1G	Failure Truncated Data CC2030201	46
Lampiran 1H	Failure Truncated Data CC2030203	46
Lampiran 1I	Failure Truncated Data CC20341002	47
Lampiran 2A	Time Truncated Data CC2017701	47
Lampiran 2B	Time Truncated Data CC2017706	47
Lampiran 2C	Time Truncated Data CC2017710	47
Lampiran 2D	Time Truncated Data CC2030202	48
Lampiran 2E	Time Truncated Data CC2040307	48
Lampiran 3A	Syntax MATLAB untuk Perhitungan Statistik Uji (<i>L</i>) <i>Failure Truncated Data</i>	49
Lampiran 3B	Syntax MATLAB untuk Perhitungan Statistik Uji (<i>L</i>) <i>Time Truncated Data</i>	49
Lampiran 4	Perhitungan Estimasi Parameter Menggunakan <i>Maximum Likelihood Estimation</i> (MLE) untuk Data <i>Time Truncated</i> pada Komponen Roda Lokomotif Seri CC2017706	50
Lampiran 5	Perhitungan <i>Cramer-von Mises Test</i> untuk Data <i>time Truncated</i> pada Komponen Roda Lokomotif Seri CC2017706	51
Lampiran 6	Perhitungan <i>Rate of Occurance of Failure</i> (ROCOF) pada Komponen Roda Lokomotif Seri CC2017706	52

Lampiran 7	Syntax MATLAB Optimasi Biaya Komponen Roda Lokomotif Seri CC201770653
Lampiran 8	Hasil Perhitungan Optimasi Biaya Komponen Roda Lokomotif Seri CC201770654

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Moda transportasi darat yaitu kereta api saat ini berkembang pesat terutama di Pulau Jawa. Seiring dengan meningkatnya jumlah pengguna jasa kereta api, maka perusahaan kereta api dituntut untuk semakin meningkatkan pelayanan serta keamanan. Hal tersebut sesuai dengan Pasal 3 Undang-Undang Nomor 23 Tahun 2007 bahwa perkeretaapian diselenggarakan dengan tujuan untuk memperlancar perpindahan orang dan/atau barang secara massal dengan selamat, aman, nyaman, cepat dan lancar, tepat, tertib dan teratur, efisien, serta menunjang pemerataan, pertumbuhan, stabilitas, pendorong, dan penggerak pembangunan nasional. Untuk meningkatkan keamanan perjalanan kereta api, maka perlu adanya kebijakan dalam perbaikan dan penggantian komponen dan mesin kereta yang digunakan. Perbaikan dan penggantian ini dilakukan karena setiap komponen dalam kereta api mempunyai batas usia pakai tertentu.

PT. Kereta Api Indonesia (Persero) merupakan perusahaan yang bergerak dalam bidang transformasi kereta api. Dalam upaya untuk melayani kepentingan publik, maka perusahaan harus memperhatikan kualitas dan kelayakan sarana pelayanan transportasi kereta api. Salah satu sarana penting dalam penyelenggaraan transportasi kereta api adalah lokomotif yang berfungsi sebagai alat penggerak utama pada kereta api. Lokomotif adalah bagian terpenting dari rangkaian kereta api dimana terdapat mesin untuk menggerakkan kereta api. Secara umum kereta api diesel mempunyai 2 tipe lokomotif, yaitu: seri CC dan seri BB. Jumlah traksi motor jenis seri CC berjumlah enam untuk menggerakkan enam pasang roda (tiga pasang didepan dan tiga pasang dibelakang), dan untuk seri BB traksi

motor berjumlah empat untuk menggerakkan empat pasang roda (dua pasang didepan dan dua pasang dibelakang). Selain itu tenaga yang dimiliki seri CC lebih besar sehingga lokomotif mampu menarik rangkaian atau gerbong lebih banyak dua kali lipat dibandingkan seri BB. Seperti yang kita ketahui bahwa roda pada kereta merupakan roda yang keseluruhannya terbuat dari besi. Ketika lokomotif berjalan maka terjadi gesekan antara rel dengan roda dimana gesekan tersebut tidak selalu terjadi pada posisi atau lingkaran yang sama karena posisi roda selalu bergerak ke kiri dan ke kanan. Hal ini menyebabkan keausan roda menjadi merata pada permukaan yang bergesekan dengan rel. Gesekan pada permukaan roda menyebabkan diameter roda semakin lama semakin mengecil, oleh karena itu untuk keselamatan perjalanan kereta api ada batas diameter minimal dimana roda masih boleh digunakan. Selain itu, rute yang ditempuh dan medan tempuh lokomotif juga mempengaruhi kecepatan keausan pada roda. Untuk meningkatkan keandalan lokomotif maka diperlukan penanganan perawatan yang baik agar tidak terjadi suatu kerusakan. Kegiatan perawatan rutin yang dilakukan biasa disebut *Preventive Maintenance* yaitu suatu kegiatan yang dilakukan untuk menjamin berfungsinya suatu peralatan produksi sehingga diperoleh suatu kualitas produksi yang optimum. Karena banyaknya roda yang digunakan untuk satu lokomotif, maka komponen ini termasuk dalam kategori komponen yang konsumtif.

Seiring dengan tujuan perkeretaapian maka perawatan lokomotif dilakukan di Dipo Lokomotif atau Balai Yasa milik PT Kereta Api Indonesia (Persero). Dipo Lokomotif Sidotopo merupakan bengkel tempat menyimpan, menyiapkan melakukan pemeriksaan, memelihara dan perbaikan ringan agar lokomotif siap untuk melakukan tugasnya menarik rangkaian kereta api. Perawatan yang dilakukan di Dipo Lokomotif sesuai dengan

petunjuk Buku Panduan Manual milik PT Kereta Api Indonesia (Persero) yang dilakukan tanpa adanya penelitian lebih lanjut apakah waktu perawatan dan penggantian tersebut sudah optimal. *Preventive maintenance* yang dilakukan di Dipo Lokomotif Sidotopo terjadwal bulanan, tiga bulanan, enam bulanan dan duabelas bulanan atau satu tahun. Termasuk dalam *preventive maintenance* yaitu pengecekan roda untuk melihat apakah diameter roda masih dalam batas minimal roda masih boleh digunakan. Sebelum diameter roda mencapai batas minimum yang diijinkan biasanya sudut *flens* roda sudah lebih dahulu mencapai batas minimum. Permukaan roda juga bisa rusak karena pengereman dan diameter roda masih belum mencapai batas minimum. Agar roda pada kasus tersebut masih bisa digunakan maka dilakukan pembubutan pada roda untuk mengembalikan profil roda menurut keadaan yang seharusnya dan dengan diameter yang lebih kecil dari sebelumnya. Sebagai asumsi bahwa setiap dilakukan pembuatan profil roda baru maka komponen akan dianggap sebagai *as good as new*. Pengambilan kebijakan perawatan dan penggantian roda lokomotif yang dilakukan oleh pihak Dipo Lokomotif Sidotopo berdasarkan pada buku panduan manual dan peraturan dinas kereta api, dimana secara rutin roda pasti akan diganti pada tahun ke empat dihitung dari awal roda dipasang. Hal tersebut mungkin saja mengakibatkan waktu dan biaya yang dikeluarkan tidak optimum karena banyaknya roda yang dipakai dengan tingkat keausan yang berbeda-beda. Oleh karena itu, peneliti ingin membantu pihak Dipo Lokomotif Sidotopo menentukan kebijakan perawatan dan penggantian komponen dengan metode yang tepat.

Pan dan Rigdon (2009) membuat *Non Homogenous Poisson Process* (NHPP) semi-hierarki model untuk data berdasarkan waktu kegagalan. Intensitas system NHPP merupakan generalisasi 3 parameter dari intensitas *Power Law*

Process (PLP) dan secara terus menerus dengan poin diskontinuitas setiap kali gagal, sehingga kompromi keandalan system antara "*as bad as old*" dan "*as good as new*" ketika system selesai diperbaiki. Kenneth, Michael dan C. Shane (2011) membuat model *Power Law Process* (PLP) untuk system diperbaiki tunggal dan model PLP hirarki untuk beberapa system diperbaiki dari model yang serupa. Pendekatan inferensial Bayesian cocok untuk mengimplementasikan *time truncated* dan *failure truncated* data. Metode Bayesian juga telah terbukti berguna dalam analisis data reliabilitas kompleks lainnya, seperti Reese et al. (2011) yang tergabung dalam data seumur hidup dari berbagai tingkat system untuk menilai keandalan system secara keseluruhan.

Penelitian sebelumnya yang dilakukan oleh Noorahma (2016) menentukan kebijakan penggantian komponen *Heat Exchanger* pada pesawat Boeing 737-800 dengan menggunakan metode *Power Low Process* dimana perbaikan dilakukan pada saat usia ke- T atau saat periode kegagalan ke- N , tergantung mana yang terlebih dahulu terjadi. Pada penelitian kali ini akan digunakan metode *Power Law Process* dengan mengambil komponen roda pada lokomotif seri CC di Dipo Lokomotif Sidotopo.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang yang telah dibicarakan sebelumnya maka permasalahan dalam penelitian ini adalah bagaimana mengoptimalkan waktu perbaikan dan waktu penggantian pada komponen roda lokomotif seri CC di Dipo Lokomotif Sidotopo sehingga dapat meminimalkan biaya.

1.3 Tujuan Penelitian

Tujuan yang ingin dicapai dalam penelitian kali ini adalah menentukan waktu optimum yang tepat untuk melakukan perbaikan pada komponen roda lokomotif seri CC. Waktu optimum tersebut diperoleh dari model optimasi yang meminimumkan biaya kerusakan sehingga kerugian-kerugian yang dialami akibat kerusakan komponen roda pada saat beroperasi dapat dicegah dan biaya repair komponen menjadi lebih ekonomis.

1.4 Batasan Masalah

Obyek yang akan diteliti adalah lokomotif diesel seri CC yang berlokasi di Dipo Sidotopo karena seri tersebut yang paling banyak digunakan dibandingkan dengan seri BB. Selain itu rute yang digunakan tiap tipe lokomotif yang berbeda diduga dapat mengakibatkan data menjadi tidak identik, sehingga model Bayesian digunakan untuk estimasi parameter. Namun dalam penelitian kali ini akan diasumsikan bahwa data identik sehingga akan digunakan model estimasi parameter dengan menggunakan *Maximum Likelihood Estimation* (MLE).

1.5 Manfaat Penelitian

Penelitian ini diharapkan dapat memberikan masukan berupa saran dan rekomendasi kepada PT Kereta Api Indonesia (Persero) khususnya Dipo Sidotopo dalam melakukan *replacement* komponen roda lokomotif dan untuk mengoptimalkan biaya perawatan komponen sehingga utilitas dari komponen yang telah ada menjadi maksimum. Selain itu penelitian ini diharapkan berguna untuk menambah wawasan dan pengetahuan mengenai manfaat ilmu statistika di bidang industri.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 *Stochastic Point Process*

Random variable $N(t)$ adalah jumlah waktu kejadian yang muncul dari sebuah kegagalan pada interval waktu $(0, t)$. Proses dari $N(t)$, ≥ 0 yang disebut dengan proses stokastik digunakan untuk mengetahui hubungan dari suatu runtutan peristiwa atau proses kejadian yang bersifat tidak pasti (Hoyland, 1994:263).

Terdapat dua jenis komponen yaitu *repairable* dan *non-repairable*, *repairable* yaitu sebuah komponen dimana ketika terjadi sebuah kerusakan maka komponen tersebut dapat diperbaiki dengan beberapa proses perbaikan selain penggantian pada seluruh sistem. *Non-repairable* jika mengalami kerusakan maka harus diganti dengan komponen yang baru dalam artian komponen tersebut tidak bisa diperbaiki (O'Connor, 2012:8-9).

Minimal *repair* yang merupakan salah satu istilah dari *preventive maintenance* yang memiliki arti bahwa setiap sistem yang gagal akan berfungsi kembali setelah perbaikan dilakukan dengan kondisi yang sama dan usia efektif yang sama seperti pada saat kejadian terakhir. Asumsi dari minimal *repair* mengarah pada model *Non-Homogenous Poisson Process* (NHPP) yang dianggap terbaik untuk *reapirable system* karena dapat digunakan untuk mendeteksi penurunan atau kenaikan sistem (Ridgon, 2000:30).

2.2 *Poisson Pocess*

Jika sebuah komponen memiliki tingkat kerusakan konstan (λ) atau rusak secara tiba-tiba maka secara langsung diperbaiki atau diganti ketika mengalami kerusakan. N adalah jumlah kejadian yang muncul dari sebuah kegagalan pada interval waktu

(0, t), banyaknya kerusakan yang memiliki distribusi Poisson dapat dituliskan dalam persamaan berikut (Rigdon, 2000: 33-35).

$$p(x) = P(N = n) = \frac{e^{-\lambda} (\lambda)^n}{n!}, \text{ untuk } n = 0, 1, 2, \dots \quad (2.1)$$

Rata-rata jumlah kerusakan adalah λ dan varians bernilai λ . Poisson dibagi dua macam yaitu proses Poisson homogen dan proses Poisson nonhomogen.

2.2.1 *Homogeneous Poisson Process (HPP)*

Homogeneous Poisson Processes (HPP) adalah proses Poisson dengan fungsi intensitas konstan, dimana waktu kedatangan bersifat independen dan berdistribusi eksponensial dengan parameter yang sama yaitu λ untuk *failure rate* (Hoyland, 1994: 270-273).

Probabilitas jumlah kegagalan oleh waktu ke- t akan sama dengan persamaan berikut.

$$P[N(t) = r] = \frac{(\lambda t)^r}{r!} e^{-\lambda t}, \text{ untuk } t = 0, 1, 2, \dots \quad (2.2)$$

2.2.2 *Non-Homogeneous Poisson Process (NHPP)*

Non-Homogeneous Poisson Processes (NHPP) adalah proses Poisson dengan fungsi intensitas tidak konstan dengan laju kedatangan berevolusi terhadap waktu. NHPP merupakan model yang sesuai jika diaplikasikan untuk sistem dengan laju kerusakan yang menurun atau meningkat, dengan menggunakan metode statistika yang relevan dan mudah untuk diaplikasikan (Crowder, 1991: 164-175). NHPP menggambarkan proses kerusakan komponen yang memiliki pola tertentu dengan jumlah kumulatif hingga waktu t adalah $N(t)$.

NHPP biasa disebut dengan *Weibull process* karena fungsi *failure rate* yang sama dengan distribusi Weibull dengan parameter *shape* (β) dan parameter *scale* (λ).

2.3 Power Law Process

Power Law Process (PLP) atau model proses Weibull merupakan salah satu model yang digunakan untuk memeriksa data yang mengikuti *Non-Homogeneous Poisson Processes* (NHPP) dengan fungsi intensitas yang dibentuk dari fungsi *survival* distribusi *Weibull* dengan persamaan berikut (Ridgon, 2000: 16).

$$S(x) = \exp \left[- \left(\frac{t}{\lambda} \right)^\beta \right], t > 0 \quad (2.3)$$

t merupakan variabel random dengan cdf sebagai berikut

$$F(x) = 1 - S(x) = 1 - \exp \left[- \left(\frac{t}{\lambda} \right)^\beta \right], t > 0 \quad (2.4)$$

Sehingga didapatkan pdf dan fungsi laju kerusakan sebagai berikut

$$f(x) = F'(x) = \frac{\beta}{\lambda} \left(\frac{t}{\lambda} \right)^{\beta-1} \exp \left[- \left(\frac{t}{\lambda} \right)^\beta \right] \quad (2.5)$$

$$w(t) = \frac{f(x)}{S(x)} = \frac{F'(x) = \frac{\beta}{\lambda} \left(\frac{t}{\lambda} \right)^{\beta-1} \exp \left[- \left(\frac{t}{\lambda} \right)^\beta \right]}{\exp \left[- \left(\frac{t}{\lambda} \right)^\beta \right]} = \frac{\beta}{\lambda} \left(\frac{t}{\lambda} \right)^{\beta-1} \quad (2.6)$$

Dimana λ dan β adalah parameter positif, disebut *Power Law Process* (PLP). Untuk $\beta < 1$ maka nilai $w(t)$ menurun, artinya keandalan meningkat. Jika $\beta > 1$ maka nilai $w(t)$ meningkat, artinya keandalan menurun. Jika nilai $\beta = 1$ maka PLP berubah menjadi HPP yang lebih sederhana dengan intensitas $\frac{1}{\lambda}$.

2.4 Failure Truncated Data dan Time Truncated Data

Failure Truncated data terjadi ketika suatu pengamatan dalam *repaireable system* berhenti setelah jumlah dari sebuah

kegagalan ditetapkan sebelum observasi, jumlah kegagalan dinotasikan dengan N_k yang merupakan *fixed* variable. T_k adalah waktu kegagalan yang merupakan *variable random*.

Time Truncated data berarti jika suatu pengamatan berhenti ketika telah ditentukan waktu ke- T , dengan kondisi N_k merupakan *variable random* dimana N_k merupakan jumlah kegagalan dari interval waktu $(0, T_k)$ dan waktu kegagalan $T_1 < T_2 < \dots < T$ adalah *fixed* variable (Leung and Cheng, 2000: 773).

2.5 Pengujian *Trend* dalam *Failure Rate*

Metode grafis sederhana yang dapat digunakan untuk melihat apakah terdapat trend dalam waktu antar kegagalan adalah plot waktu kegagalan dengan nilai t_i sebagai sumbu horizontal, dan nilai kumulatif waktu kegagalan sepanjang waktu t_i , $N(t_i)$ pada sumbu vertikalnya (Ridgon, 2000:87). Secara statistik, untuk menguji apakah terdapat trend pada laju kegagalan dari komponen maka salah satu uji yang bisa digunakan adalah uji MIL-HDBK 189 (Ridgon, 2000:110-112), dengan hipotesis yang digunakan adalah sebagai berikut.

H_0 : Waktu kegagalan mengikuti *Homogenous Poisson Process* (HPP) atau tidak ada trend

H_1 : Waktu kegagalan mengikuti *Non-Homogenous Poisson Process* (NHPP)

Statistik uji untuk *failure truncated data* dapat dinyatakan dalam persamaan sebagai berikut.

$$L = \frac{\left(\frac{\sum_{i=1}^{N-1} T_i}{N-1} - \frac{T_N}{2} \right)}{\frac{T_N}{\sqrt{12(N-1)}}} \quad (2.7)$$

Dengan T_i adalah waktu dari kegagalan ke- i untuk

$i = 1, 2, \dots, N$.

Statistic uji untuk *time truncated data* adalah sebagai berikut.

$$L = \frac{\left(\frac{\sum_{i=1}^N T_i}{N} - \frac{T}{2} \right)}{\frac{T}{\sqrt{12N}}} \quad (2.8)$$

Dengan T_1, \dots, T_N adalah waktu dari kegagalan untuk proses observasi pada interval ke $(0, T)$ dan T adalah waktu yang ditetapkan sebelum observasi.

L merupakan pendekatan dari distribusi normal standar dengan mean 0 dan standar deviasi 1 untuk *time truncated data* atau *failure truncated data* pada tingkat signifikansi sebesar 5%. Keputusan diambil dengan membandingkan statistic uji (L) terhadap nilai kritis pada toleransi kesalahan 0.05. Ketika nilai $L < -Z_{\alpha/2}$ atau $L > Z_{\alpha/2}$ maka hipotesis awal (H_0) ditolak, sehingga waktu kegagalan $\{T_i = 1, 2, \dots, N\}$ tidak mengikuti *Homogenous Poisson Process* (HPP).

Ketika nilai L menunjukkan tingkat signifikansi yang sangat besar berarti jumlah dari kegagalan lebih besar dari ekspektasi, hal ini mengindikasikan bahwa waktu kegagalan cenderung lebih besar diakhir interval $(0, T)$ dengan kata lain sistem semakin memburuk maka model non-stasioner dari proses kegagalan mengikuti *Non-Homogeneous Poisson Process* (NHPP). Nilai yang kecil dari L mengindikasikan terjadinya peningkatan kehandalan suatu komponen sehingga proses kegagalan mengikuti *Homogenous Poisson Process* (HPP) (Rigdon and Basu, 2000: 110).

2.6 Estimasi Parameter

2.6.1 Maximum Likelihood Estimation (MLE) untuk Failure Truncated Data

Parameter *Power Law Process* (PLP) untuk satu komponen *repairable* dengan N kali kerusakan dengan waktu kegagalan bernilai $0 < T_1 < T_2 < \dots < T_N$, dengan menggunakan *Maximum Likelihood Estimation* (MLE). Perhitungan untuk parameter λ dan β untuk *failure truncated* yang dinyatakan dalam persamaan berikut. (Ridgon and Basu, 2000: 116-118).

$$\lambda = \frac{T_N}{N^{\frac{1}{\beta}}} \quad (2.9)$$

dan

$$\hat{\beta} = \frac{N}{\sum_{i=1}^{N-1} \ln \left(\frac{T_N}{T_i} \right)} \quad (2.10)$$

2.6.2 Maximum Likelihood Estimation (MLE) untuk Time Truncated Data

Diberikan nilai waktu kegagalan sebesar $T_1 < T_2 < \dots < T_N < T$, pengamatan waktu kegagalan berhenti setelah ditetapkan waktu ke- T , sehingga kegagalan ke- N merupakan variabel random. *Maximum Likelihood Estimation* (MLE) untuk parameter λ dan β yang dinyatakan dalam persamaan berikut (Ridgon and Basu, 2000: 135-137).

$$\hat{\beta} = \frac{N}{\sum_{i=1}^N \ln \left(\frac{T}{T_i} \right)} \quad (2.11)$$

dan

$$\lambda = \frac{T}{N^{\frac{1}{\beta}}} \quad (2.12)$$

dengan $T_N = T$

2.7 Goodness of Fits Test

Goodness of fits tests digunakan untuk melihat apakah model sesuai dengan *Power Law Process* (PLP) atau tidak, pengujian dilakukan dengan menggunakan *Cramer-Von Mises Test* untuk menguji apakah waktu kegagalan dari system *repairable* mengikuti *Non-Homogeneous Poisson Process* (NHPP). Hipotesis yang digunakan adalah sebagai berikut (Crow, 1975:28).

H_0 : Waktu kegagalan untuk mesin ke- K mengikuti HPP dengan *Rate of Occurance of Failure* (ROCOF) sebesar λ atau $\beta = 1$

H_1 : Waktu kegagalan untuk mesin ke- K mengikuti NHPP dengan *Rate of Occurance of Failure* (ROCOF) sebesar $\frac{\beta}{\lambda} \left(\frac{t}{\lambda} \right)^{\beta-1}$ atau

$\beta \neq 1$

Statistik uji untuk metode *Crame-Von Mises* dinyatakan dalam persamaan berikut ini.

$$C_R^2 = \frac{1}{12M} + \sum_{j=1}^M \left(\hat{R}_i - \frac{2i-1}{2M} \right)^2 \quad (2.13)$$

Dimana

$$\hat{R}_i = \left(\frac{T_i}{T} \right)^{\bar{\beta}} \quad (2.14)$$

Nilai *unbiased estimator* untuk β sebagai berikut

$$\bar{\beta} = \frac{M}{N} \hat{\beta} \quad (2.15)$$

Hipotesis *null* ditolak jika C_R^2 lebih kecil dari nilai kritis untuk *Goodness of fit test Cramer-Von Mises* pada level signifikansi sebesar 5%.

2.8 Model Optimasi

Suatu mesin diganti secara teratur dalam jangka waktu ke- T atau pada kegagalan ke- N setelah dilakukan instalasi, tergantung mana yang lebih dahulu terjadi pertama kali. Mesin ini akan mengalami perbaikan minimal diantara penggantian secara

berkala saat terjadi kegagalan, sehingga tingkat kegagalan tidak terganggu. Waktu yang digunakan untuk memperbaiki dan penggantian mesin diasumsikan sangat minimum atau dapat diabaikan. Kebijakan penggantian optimal yang dilakukan berdasarkan dengan meminimalkan jangka panjang dari model biaya dinyatakan dalam persamaan berikut ini (Nakagawa and kowada, 1983:180-182).

$$\begin{aligned}
 & T \Pr\{Y_n > T\} + \int_0^T t d \Pr\{Y_n > T\} \\
 &= \int_0^T \Pr\{Y_n > T\} \\
 &= \sum_{j=0}^{n-1} \int_0^T \frac{[W(t)]^j}{j!} e^{-W(t)} dt
 \end{aligned} \tag{2.16}$$

untuk $j=0,1,2,\dots,(n-1)$

Nilai ekspektasi dari waktu kegagalan sampai *replacement* komponen dinyatakan dalam persamaan sebagai berikut.

$$\begin{aligned}
 & \sum_{j=0}^{n-1} j \Pr\{N(T) = j\} + n \Pr\{Y_n \leq T\} \\
 &= n - \sum_{j=0}^{n-1} (n-j) \frac{[W(T)]^j}{j!} e^{-W(T)}
 \end{aligned} \tag{2.17}$$

Fungsi biaya penggantian komponen berdasarkan kerusakan ke- N dan waktu biaya ke- T dinyatakan dalam persamaan sebagai berikut.

$$C(T;n) = \frac{c_f \left[n - \sum_{j=0}^{n-1} (n-j) \frac{[W(T)]^j}{j!} e^{-W(T)} \right] + c_p}{\sum_{j=0}^{n-1} \int_0^T \frac{[W(t)]^j}{j!} e^{-W(t)} dt} \tag{2.18}$$

Untuk $T > 0, n = 1, 2, \dots$ dan $j = 0, 1, 2, \dots, (n-1)$

Dengan c_f adalah *cost of failure* atau rata-rata biaya perbaikan karena kerusakan dan c_p adalah rata-rata biaya perbaikan minimal atau biaya *preventive maintenance*. Kebijakan penggantian yang optimal untuk setiap jenis mesin atau komponen ditentukan dengan meminimalkan persamaan $C(T;n)$ yang berhubungan dengan nilai T dan N .

Fungsi nilai laju kerusakan terhadap waktu untuk *Power Law Process* (PLP) dinyatakan dalam persamaan berikut ini.

$$W(t) = \int_0^t w(t) dt = \left(\frac{t}{\lambda} \right)^\beta \quad (2.19)$$

2.9 Roda Lokomotif Kereta Api

Roda secara umum adalah obyek berbentuk lingkaran, yang bersama dengan sumbu dapat menghasilkan suatu gerakan dengan gesekan kecil dengan cara bergulir. Kemajuan teknologi pengecoran mampu membuat roda yang seluruhnya terbuat dari besi, seperti pada roda lokomotif. Bagian-bagian roda seperti pada Gambar 2.1 (a) dapat dijelaskan sebagai berikut :

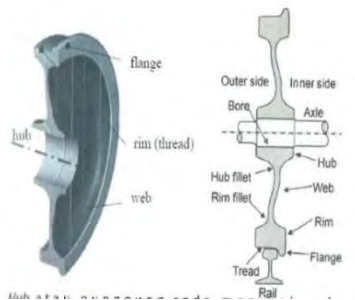
1. *Hub* atau *punggung* merupakan bagian tengah pusat roda sebagai penyokong utama yang terdapat lubang (*bore*) yang digunakan untuk memasukkan as roda sehingga menjadi satu kesatuan perangkat.
2. *Web* adalah suatu bagian dengan bentuk tertentu (bergelombang) yang menghubungkan antara hub/punggung roda dan *rim* /badan roda sehingga mampu menahan suatu beban tertentu. Setiap konfigurasi web mempunyai peruntukan dan aplikasi tersendiri.
3. *Tread* atau telapak roda yang merupakan bagian dari badan roda yang berbentuk kerucut (*conis*) dengan kemiringan 1:40 untuk roda sarana di PT. KAI. *Tread* merupakan titik kontak

utama dengan rel. Titik tengah dari *tread* ini yang biasanya digunakan untuk menentukan diameter suatu roda.

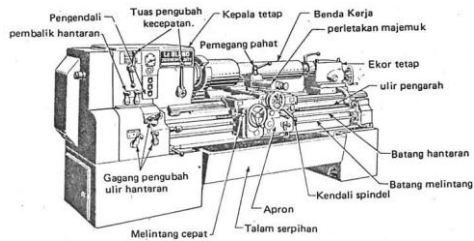
4. *Rim* atau badan roda merupakan bagian dari roda sebagai satu kesatuan yang terdiri atas *tread*/tapak roda dan *flange*/flens roda.
5. *Flange* adalah bagian dalam dari roda yang menonjol (naik) dengan tinggi, lebar dan sudut tertentu sehingga memungkinkan roda dapat berjan diatas rel dan mencegah dari tergelincir atau mengalami anjlok.

Diameter dan tebal roda disesuaikan dengan tekanan gandar dan masing-masing perusahaan jalan rel mempunyai spesifikasi sendiri-sendiri dari roda yang digunakannya. Ukuran diameter roda pada umumnya antara 840 mm sampai 1000 mm, dimana batas minimum diameter roda tidak boleh digunakan sebesar 680 mm. Hal tersebut disebabkan karena gesekan antara roda dengan rel yang menyebabkan keausan pada roda. Selain keausan pada permukaan roda, juga terjadi keausan pada flens roda akibat gesekan antara flens dan sisi dalam rel terutama pada tikungan. Gesekan antara flens dan sisi dalam rel menyebabkan flens semakin lama semakin menipis.

Sebelum diameter roda mencapai batas minimum yang diijinkan biasanya sudut flens roda sudah lebih dahulu mencapai batas minimum. Permukaan roda juga bias rusak karena pengereman dan diameter roda masih belum mencapai batas minimum. Agar roda pada kasus tersebut masih bisa digunakan, dilakukan pembubutan roda untuk mengembalikan profil roda menurut keadaan yang seharusnya dan dengan diameter yang lebih kecil dari sebelumnya. Mesin bubut yang digunakan seperti pada Gambar 2.1 (b). Pembubutan bisa diulang lagi selagi diameter roda belum mencapai batas minimum.



(a)



(b)

Gambar 2.1 Roda Lokomotif

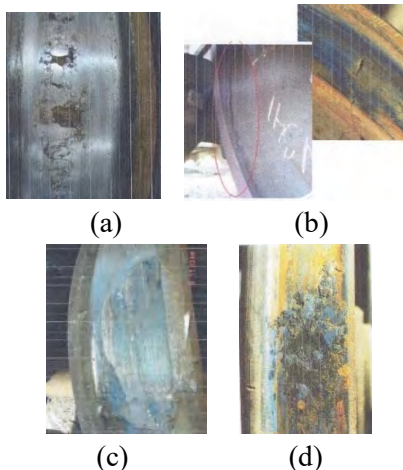
(a) Bagian-Bagian Roda (b) Mesin Bubut Roda

BAB III

METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Sumber Data dan Variabel Penelitian

Data yang digunakan dalam penelitian ini merupakan data sekunder dengan variabel usia komponen (*lifetime*) dengan satuan hari yang dihitung mulai dari komponen baru dipakai sampai komponen mengalami kerusakan pertama atau sampai waktu kerusakan yang telah ditetapkan (*preventive maintenance*). Jika komponen roda mengalami kerusakan maka pembubutan ringan tanpa melepas perangkat roda bisa dilakukan di Dipo, namun jika pembubutan dilakukan dengan cara melepas roda dan dilakukan penggantian komponen roda maka harus dilakukan di Balai Yasa Pusat Yogyakarta. Data yang digunakan mulai dari bulan Januari 2012 hingga Januari 2016. Macam-macam kerusakan yang dialami oleh roda lokomotif bisa dilihat dalam Gambar 3.1 (a) s/d (d).



Gambar 3.1 Macam-macam Cacat pada Roda

(a) Cacat *Spalling Wheels* (b) Cacat *Thermal Wheels* (c) Cacat *Skidde/Flat Wheels* (d) Cacat *Scaled Wheels*

Tabel 3.1 Struktur Data

Seri Lokomotif CC	Umur Komponen (Hari)
CC 201	T_1
	T_2
	\vdots
	T_{n_1}
CC 203	T_1
	T_2
	\vdots
	T_{n_2}
CC 204	T_1
	T_2
	\vdots
	T_{n_3}

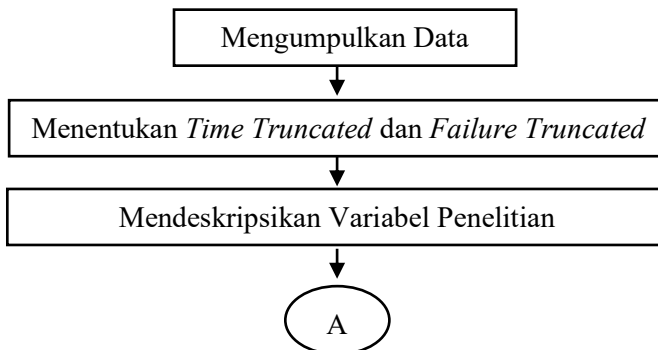
3.2 Langkah Analisis

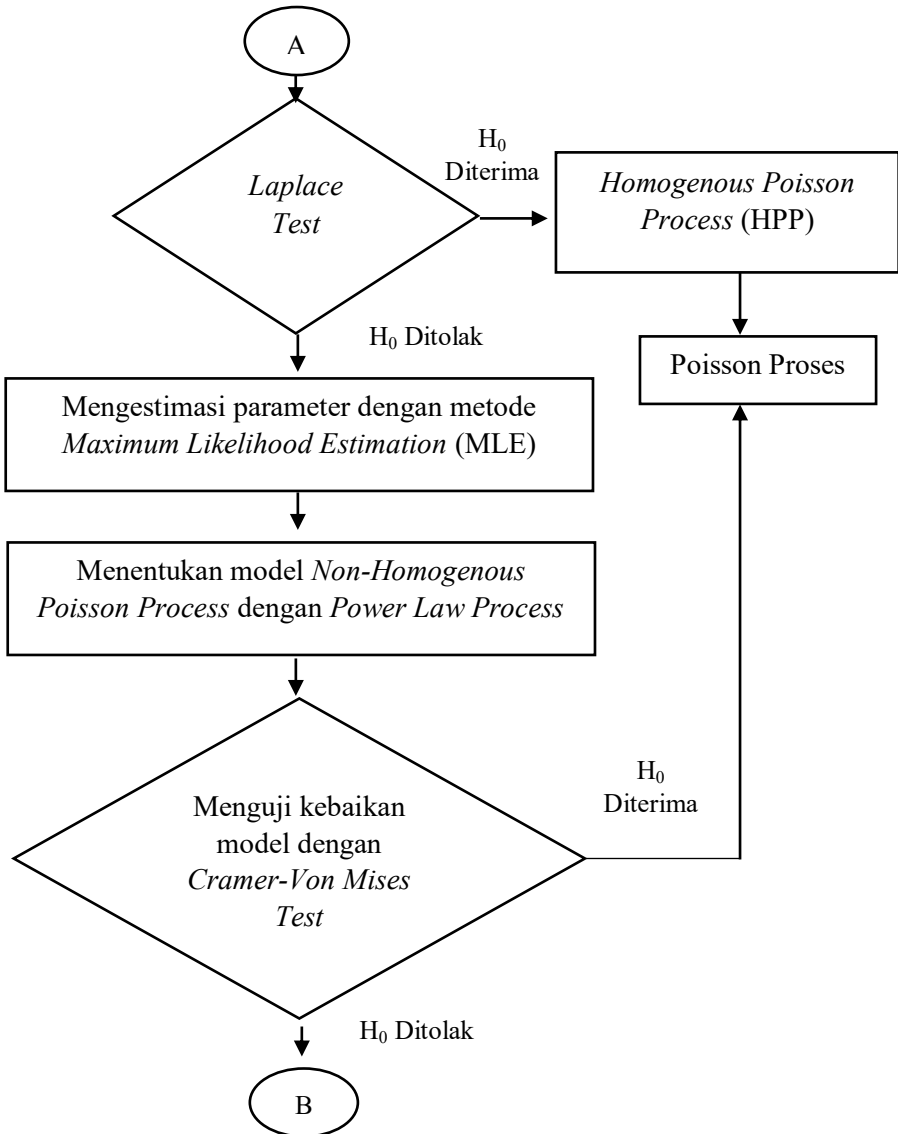
Langkah-langkah analisis yang dilakukan untuk mencapai tujuan dari penelitian adalah sebagai berikut.

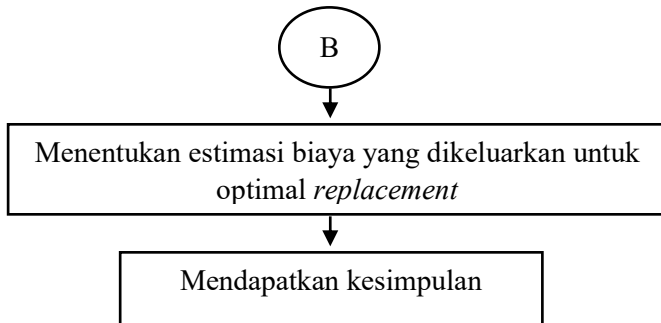
1. Mengumpulkan variabel usia komponen roda yang mengalami kerusakan minimal dua kali.
2. Menetapkan *time truncated* untuk pengamatan yaitu sebesar empat tahun dan untuk *failure truncated* data ditentukan sebanyak 3 kali kerusakan.
3. Mendeskripsikan data umur komponen (*life time*) roda lokomotif tipe CC di Dipo Lokomotif Sidotopo
4. Menguji adanya *trend* dalam waktu kegagalan komponen roda lokomotif. Melakukan pendugaan dan pengujian menggunakan *Laplace Test*.

5. Jika terdapat *trend* dalam waktu kegagalan maka diduga data tersebut mengikuti *Non-Homogeneous Poisson Processes* (NHPP) yang dibentuk dari *Power Law Process* (PLP) dengan *Rate of Occurance of Failure* (ROCOF) yang tidak konstan, sehingga dapat dilakukan estimasi parameter menggunakan metode *Maximum Likelihood Estimation* (MLE).
6. Menguji kebaikan model *Power Law Process* (PLP) dengan metode *Cramer-von Mises test* untuk mengetahui apakah waktu kegagalan komponen roda lokomotif mengikuti *Non-Homogeneous Poisson Processes* (NHPP).
7. Mendapatkan model optimasi untuk menentukan waktu penggantian yang minimum biaya kerusakan komponen roda lokomotif.
8. Mendapatkan kesimpulan dari hasil analisis.

Langkah-langkah analisis diatas disajikan dalam bentuk diagram alir sebagai berikut.







Gambar 3.2 Diagram Alir Penelitian

BAB IV

ANALISIS DAN PEMBAHASAN

Komponen roda lokomotif merupakan salah satu komponen yang *repairable* sehingga ketika terjadi kerusakan maka komponen tersebut akan dilakukan perbaikan. Perbaikan yang dilakukan membuat kondisi komponen roda seperti sedia kala atau *as good as new*. Perawatan yang dilakukan di Dipo Lokomotif Sidotopo sudah terjadwal sesuai dengan Buku Panduan Manual milik PT. Kereta Api (Persero), namun belum pernah dilakukan penelitian untuk melihat apakah jadwal tersebut sudah optimum dalam hal meminimalkan biaya. Dalam kasus ini perbaikan yang dilakukan tidak dapat secara terus menerus, harus ada sebuah penggantian komponen pada waktu tertentu, karena semakin sering suatu komponen diperbaiki maka akan ada indikasi biaya yang semakin besar. Penelitian kali ini akan menjelaskan bagaimana karakteristik kerusakan dari komponen roda lokomotif dan kapan komponen roda lokomotif harus dilakukan tindakan penggantian dengan menggunakan metode *Power Law Process*.

Berikut akan dijelaskan karakteristik dari data *lifetime* untuk komponen roda pada masing-masing seri lokomotif.

4.1 Karakteristik Data *Lifetime* Komponen Roda Lokomotif Kereta Api Seri CC

Lokomotif kereta api seri CC memiliki traksi motor sebanyak enam untuk menggerakkan enam pasang roda (tiga pasang didepan dan 3 pasang dibelakang), dimana jika salah satu roda mengalami kerusakan maka keseluruhan roda harus dilakukan perbaikan. Lokomotif kereta api yang dimiliki Dipo Lokomotif Sidotopo sebanyak 80 lokomotif yang beroperasi dengan berbagai macam tipe yang digunakan untuk menarik rangkaian kereta api lokal, jarak jauh maupun kereta barang dengan berbagai macam kelas.

4.1.1 Karakteristik *Failure Truncated Data Lifetime* Komponen Roda Lokomotif Kereta Api Seri CC

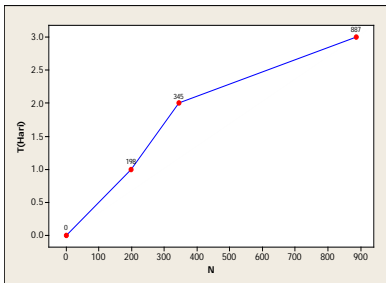
Failure truncated data yang digunakan dalam penelitian kali ini adalah sebanyak tiga kali kerusakan, yang artinya bahwa pengamatan akan dihentikan jika komponen sudah mengalami kerusakan sebanyak tiga kali. Waktu atau usia kerusakan yang didapatkan selama mengalami kerusakan sebanyak tiga kali merupakan variabel random, sehingga masing-masing komponen akan mempunyai usia yang berbeda-beda. Hasil perhitungan statistika deskriptif dari komponen roda lokomotif kereta api seri CC untuk masing-masing tipe lokomotif berdasarkan Lampiran 1A-1H yang dirangkum dalam Tabel 4.1 sebagai berikut.

Tabel 4.1 Statistika Deskriptif *Lifetime* (Hari) Komponen Roda Lokomotif Seri CC data *Failure Truncated*

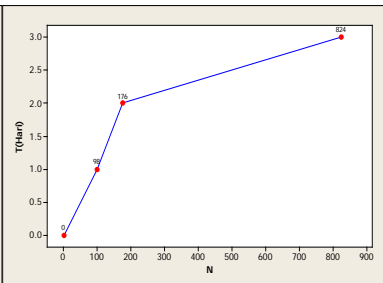
Roda Lokomotif	Kerusakan Ke-N		
	1	2	3
CC 201 7703	198	345	887
CC 201 7711	98	176	824
CC 201 7713	498	545	1473
CC 201 7718	446	587	635
CC 201 7719	333	367	451
CC 201 8348	292	897	1034
CC 203 0201	514	717	1276
CC 203 0203	371	506	914
CC 204 1002	276	465	560

Laju kerusakan berdasarkan Tabel 4.1 pada setiap tipe lokomotif menunjukkan bahwa lokomotif yang memiliki waktu hidup paling lama adalah lokomotif tipe CC2017713 yaitu sebesar 1473 hari, dengan waktu kerusakan pertama kali adalah 498 hari. Waktu tercepat terjadi kerusakan pertama kali yaitu 98 hari dialami oleh lokomotif tipe CC2017711 dengan waktu kerusakan terakhir yaitu 824 hari.

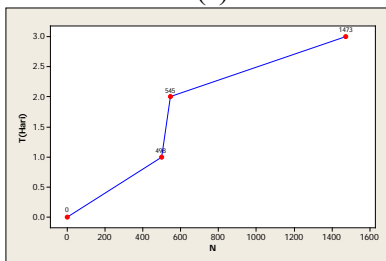
Berdasarkan data yang terlampir pada Lampiran 1A-1H disajikan secara visual plot waktu antar kegagalan antara jumlah kerusakan (N) dengan kumulatif waktu kerusakan dari ke sembilan tipe lokomotif disajikan sebagai berikut.



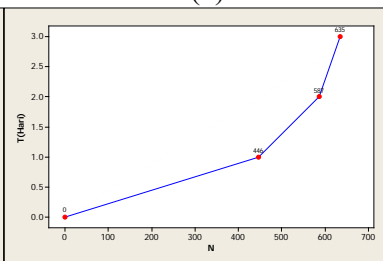
(a)



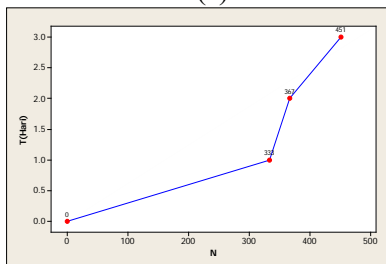
(b)



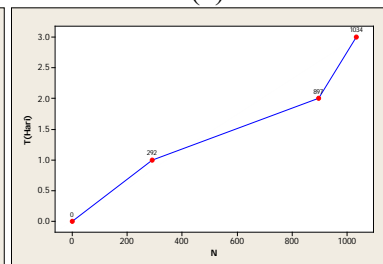
(c)



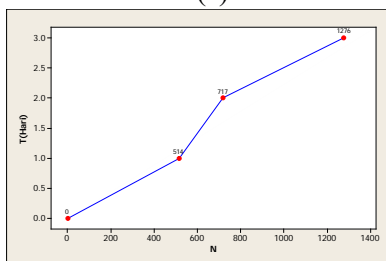
(d)



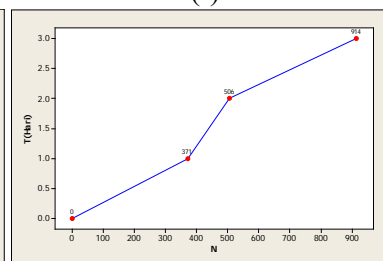
(e)



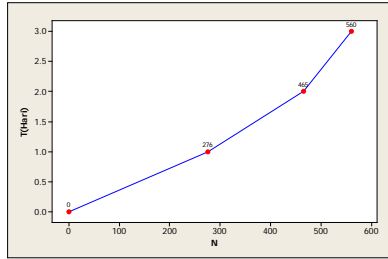
(f)



(g)



(h)



(i)

Gambar 4.1 Plot Perbandingan Jumlah Kerusakan (N) dengan Waktu Kumulatif untuk Roda Lokomotif

(a) CC2017703, (b) CC2017711, (c) CC2017713, (d) CC2017718,
(e) CC2017719, (f) CC2018348, (g) CC2030201, (h) CC2030203
dan (i) CC2041002

Pengamatan untuk data *failure truncated* ditentukan sebanyak tiga kali kerusakan yang menghasilkan umur kerusakan berbeda-beda tiap tipe lokomotif. Gambar 4.1 poin (a) menunjukkan komponen roda lokomotif untuk tipe CC2017703 waktu pertama kali saat mengalami kerusakan adalah ketika komponen sudah beroperasi selama 198 ha ri. Jarak antar kerusakan pertama dan kedua yaitu sebesar 147 hari, jarak kerusakan kedua dengan kerusakan ketiga sebesar 542 ha ri. Waktu kerusakan yang dialami komponen roda lokomotif menunjukkan bahwa semakin sering komponen tersebut mengalami kerusakan, maka waktu antar kerusakan selanjutnya akan semakin kecil, hal ini menandakan bahwa komponen semakin cepat rusak seiring dengan waktu.

4.1.2 Karakteristik *Time Truncated Data Lifetime* Komponen Roda Lokomotif Kereta Api Seri CC

Selanjutnya dilakukan penelitian dengan menggunakan time truncated data dengan T yang telah ditetapkan sebesar 1460 hari, hal ini berarti bahwa pengamatan akan berhenti ketika komponen telah beroperasi selama 1460 hari. Selama interval waktu yang telah ditentukan maka akan diperoleh variabel random yaitu jumlah kerusakan (N) pada masing-masing tipe

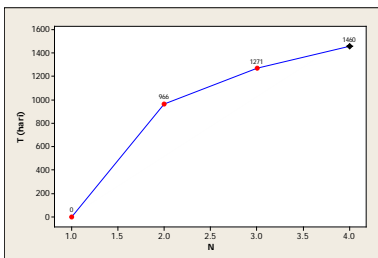
lokomotif sehingga hasilnya akan berbeda-beda. Hasil perhitungan statistika deskriptif dari komponen roda lokomotif kereta api seri CC berdasarkan Lampiran 2A-2E adalah sebagai berikut.

Tabel 4.2 Statistika Deskriptif *Lifetime* (Hari) Komponen Roda Lokomotif Seri CC data *Time Truncated*

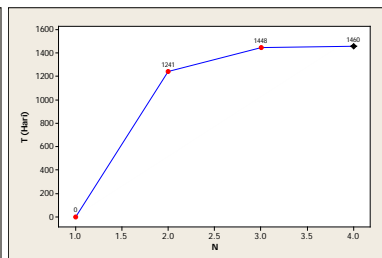
Roda Lokomotif	Kerusakan Ke-N			
	1	2	3	4
CC 201 7701	966	1271		
CC 201 7706	1241	1448		
CC 201 7710	570	612	785	1093
CC 203 0202	372	492	591	981
CC 204 0307	371	435	505	1271

Roda lokomotif untuk seri CC2017701 dan CC2017706 mempunyai jumlah kerusakan sebanyak 2 kali selama waktu terpotong $T=1460$ hari, dan untuk roda lokomotif seri CC2017710, CC2030202 dan CC2040307 mempunyai jumlah kerusakan sebesar 4 kali. Laju kerusakan berdasarkan Tabel 4.2 pada setiap roda lokomotif menunjukkan bahwa roda lokomotif yang memiliki waktu hidup paling lama adalah roda lokomotif tipe CC2017706 yaitu sebesar 1448 hari, dengan waktu kerusakan pertama kali sebesar 1241.

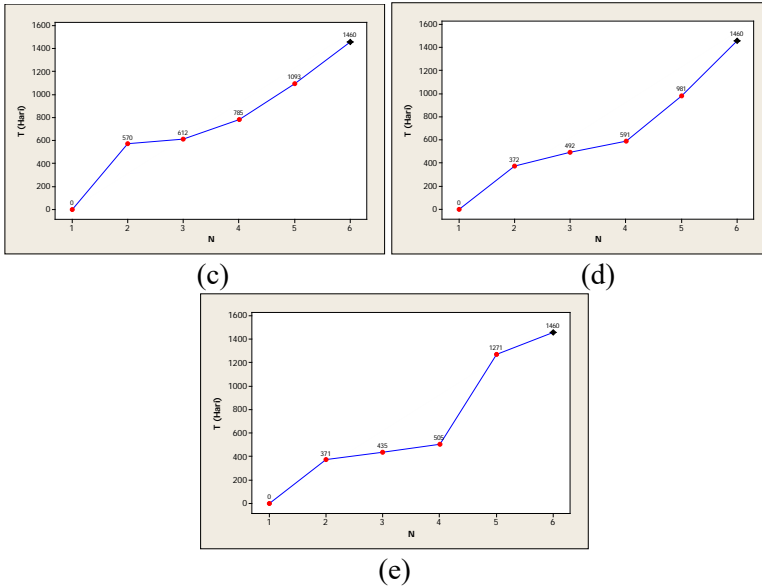
Secara visual plot waktu antar kegagalan antara jumlah kerusakan (N) dengan kumulatif waktu kerusakan dari ke lima tipe lokomotif berdasarkan Lampiran 2A-2E disajikan sebagai berikut.



(a)



(b)



Gambar 4.2 Plot Perbandingan Jumlah Kerusakan (N) dengan Waktu Kumulatif untuk Roda Lokomotif
(a) CC2017701, (b) CC2017706, (c) CC2017710, (d) CC2030202 dan (e) CC2040307

Pada Gambar 4.2 untuk komponen roda lokomotif tipe CC2017701 terdapat 2 kali kerusakan yang pernah dialami selama beroperasi. Waktu pertama kali komponen mengalami kerusakan adalah ketika komponen sudah beroperasi selama 966 hari. Untuk jarak antar kerusakan pertama dan kedua yaitu sebesar 300 hari. Untuk komponen roda lokomotif seri CC2017710 ditemukan ada 4 kali kerusakan selama komponen beroperasi. Waktu pertama kali terjadi kerusakan pada saat komponen sudah beroperasi selama 570 hari, selanjutnya jarak antara kerusakan pertama dan kedua selama 42 hari, jarak antara kerusakan kedua dan ketiga selama 173 hari dan jarak antara kerusakan ketiga dan keempat selama 308 hari. Waktu kerusakan yang dialami komponen roda lokomotif menunjukkan bahwa semakin sering komponen tersebut mengalami kerusakan, maka waktu antar kerusakan

selanjutnya akan semakin kecil, hal ini menandakan bahwa komponen semakin cepat rusak seiring dengan waktu.

4.2 Pengujian *Trend* Dalam *Failure Rate* pada Data *Lifetime* Komponen Roda Lokomotif Kereta Api Seri CC

Langkah pertama dalam menganalisis data dari *repaireable system* adalah mengetahui apakah terdapat *trend* pada waktu antara kegagalan dari komponen roda lokomotif kereta api seri CC. Uji *Laplace Test* merupakan metode yang dapat digunakan untuk menguji adanya *trend* dengan membandingkan statistik uji (L) untuk *time truncated data* dan *failure truncated data* terhadap nilai *critical value* $Z_{\alpha/2} = 1.96$ dengan nilai $\alpha = 0.05$. Hipotesis *null* yang digunakan adalah data *lifetime* masing-masing tipe lokomotif mengikuti *Homogenous Poisson Process* (HPP).

4.2.1 Pengujian *Trend* dalam *Failure Rate* untuk *Failure Truncated Data*

Hasil perhitungan nilai statistik uji *Laplace Test* pada data *lifetime* masing-masing komponen roda lokomotif untuk *failure truncated data* berdasarkan Lampiran 3A adalah dengan membandingkan nilai (L) dengan 1.96 yang disajikan dalam Tabel 4.3 sebagai berikut.

Tabel 4.3 *Laplace Test* untuk *Failure Truncated Data*

Roda Lokomotif	(L)	Keputusan
CC 201 7703	-0.949	Gagal Tolak H_0
CC 201 7711	-1.6349	Gagal Tolak H_0
CC 201 7713	-0.71506	Gagal Tolak H_0
CC 201 8348	0.3671	Gagal Tolak H_0
CC 203 0201	-0.0863	Gagal Tolak H_0

Pada Tabel 4.3 untuk kelima tipe lokomotif memiliki nilai (L) kurang dari nilai 1.96 sehingga dapat disimpulkan bahwa kelima tipe lokomotif mengikuti *Homogenous Poisson Process* (HPP) sehingga tidak dapat dianalisis lebih lanjut dengan menggunakan metode *Power Law Process*.

4.2.2 Pengujian *Trend* dalam *Failure Rate* untuk *Time Truncated Data*

Hasil perhitungan nilai statistik uji data *lifetime* masing-masing komponen roda lokomotif untuk *time truncated data* berdasarkan Lampiran 3B disajikan dalam Tabel 4.4 sebagai berikut.

Tabel 4.4 *Laplace Test* untuk *Time Truncated Data*

Roda Lokomotif	(L)	Keputusan
CC 201 7701	1.3036	Gagal Tolak H_0
CC 201 7706	2.0619	Tolak H_0
CC 201 7710	1.1507	Gagal Tolak H_0
CC 203 0202	-3.978	Gagal Tolak H_0
CC 204 0307	-0.4009	Gagal Tolak H_0

Kriteria penolakan *null* hipotesis adalah apabila nilai (L) > 1.96. Tipe lokomotif CC2017706 mempunyai nilai statistik uji lebih besar dibandingkan dengan 1.96 maka keputusan yang didapat adalah tolak H_0 sehingga data *lifetime* pada lokomotif CC2017706 mengikuti *Non-homogenous Poisson Process* (NHPP). Untuk tipe lokomotif CC2017701, CC2017710, CC2030202 dan CC2040307 mengikuti *Homogenous Poisson Process* (HPP) karena nilai statistik ujinya lebih kecil dibandingkan dengan 1.96.

Komponen roda lokomotif yang dapat dianalisis lebih lanjut adalah yang mengikuti *Non-homogenous Poisson Process* (NHPP) yaitu roda lokomotif seri CC2017706.

4.3 Estimasi Parameter Data *Lifetime* Komponen Roda Lokomotif

Estimasi parameter untuk data *lifetime* komponen roda lokomotif pada masing-masing tipe lokomotif dilakukan dengan menggunakan metode *Maximum Likelihood Estimation* untuk *failure truncated data* dan *time truncated data*.

4.3.1 Estimasi Parameter Data *Lifetime* Komponen Roda Lokomotif untuk *Time Truncated Data*

Perhitungan estimasi parameter untuk data *lifetime* komponen roda lokomotif seri CC2017706 pada pengamatan *time truncated data* dengan menggunakan rumus β pada persamaan (2.8) dan nilai λ dicari dengan menggunakan rumus (2.7) berdasarkan perhitungan pada Lampiran 4 disajikan dalam Tabel 4.5 sebagai berikut.

Tabel 4.5 Estimasi Parameter *Time Truncated Data*

Roda Lokomotif Seri CC2017706	Estimasi Parameter	
	β	λ
CC 201 7706	11.712	1376.097

Tabel 4.5 menunjukkan hasil perhitungan estimasi parameter β dan λ untuk *time truncated data* komponen roda lokomotif seri CC2017706 dengan taksiran parameter β sebesar 11.712 dan parameter λ sebesar 1376.097.

4.4 *Goodness of Fit Test*

Untuk melihat apakah model sesuai dengan metode *Power Law Process* (PLP), maka akan digunakan pengujian dengan menggunakan *Cramer-von Mises Test*. Pengujian ini digunakan untuk melihat apakah system mengikuti *Non-Homogenous Poisson Process*.

4.4.1 *Goodness of Fit Test* untuk Komponen Roda Lokomotif Seri CC2017706

Sebelum mendapatkan nilai statistic uji C_R^2 , langkah awal yang dilakukan adalah mendapatkan nilai dari *conditional* MLE dari β .

$$\tilde{\beta} = \frac{N}{\sum_{i=1}^N \ln \frac{T}{T_i}}$$

Sehingga perhitungan *unbiased conditional* MLE dari β sebagai berikut. Berikut adalah nilai

$$\bar{\beta} = \frac{N-1}{N} \tilde{\beta}$$

Untuk *time truncated* data maka C_R^2 dihitung dengan rumus sebagai berikut.

$$C_R^2 = \frac{1}{12(N-1)} + \sum_{i=1}^{n-1} \left(\hat{R}_i - \frac{2i-1}{2(N-1)} \right)^2$$

Berikut adalah hasil perhitungan nilai dari *conditional* MLE dan *unbiased conditional MLE* dari β

$$\tilde{\beta} = \frac{N}{\sum_{i=1}^N \ln \frac{T}{T_i}} = \frac{2}{0.1708} = 11.712$$

$$\bar{\beta} = \frac{N-1}{N} \tilde{\beta} = \frac{2-1}{1} (11.712) = 5.8558$$

Nilai kritis untuk goodness of fits test *Cramer Von-Mises* pada level signifikan sebesar 5% dan $N=2$ maka diperoleh nilai 0.175. Hasil perhitungan statistik uji *Cramer Von-Mises* berdasarkan Lampiran 5 adalah sebagai berikut.

$$C_R^2 = \frac{1}{12(n-1)} + \sum_{i=1}^{n-1} \left(\hat{R}_i - \frac{2i-1}{2(n-1)} \right)^2 = \frac{1}{12(2-1)} + 0.0596 = 0.143$$

Nilai statistik uji dengan menggunakan *Cramer-von Mises test* sebesar 0.143, nilai tersebut dibandingkan dengan nilai *critical value* 0.175 yang lebih kecil maka keputusan yang didapat adalah Tolak H_0 artinya bahwa komponen roda untuk lokomotif seri CC2017706 mengikuti *Non-Homogenous Poisson Process* (NHPP) dengan *Power Law Process* (PLP). Berikut adalah *Rate of Occurance of Failure* (ROCOF) dari roda lokomotif seri CC2017706.

Komponen roda lokomotif seri CC2017706 mengikuti *Non-Homogenous Poisson Process* (NHPP) dengan laju kerusakan yang tidak konstan. Hal ini dapat dibuktikan dari Tabel 4.6 yang menunjukkan bahwa laju kerusakan komponen dari waktu ke waktu terus meningkat. Adanya *trend* menunjukkan bahwa

semakin besar laju kerusakan komponen yang dialami oleh roda lokomotif seri CC2017706 maka semakin besar pula kemungkinan komponen tersebut gagal beroperasi. Berikut adalah nilai *Rate of Occurance of Failure* (ROCOF) Roda Lokomotif Seri CC2017706 yang diringkas dalam Tabel 4.6 berdasarkan Lampiran 6.

Tabel 4.6 *Rate of Occurance of Failure* (ROCOF) Roda Lokomotif Seri CC2017706

<i>Time (Day)</i>	Roda Lokomotif Seri CC2017706
1000	0.000279
1100	0.000773
1200	0.001963
1300	0.004627
1400	0.010235
1460	0.016044

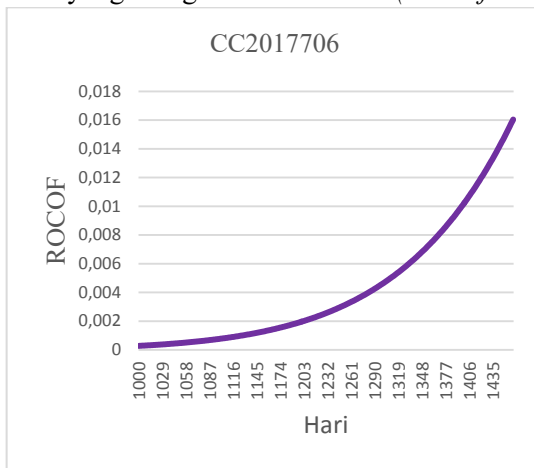
Secara visual *Rate of Occurance of Failure* (ROCOF) Roda Lokomotif Seri CC2017706 berdasarkan Lampiran 6 disajikan dalam Gambar 4.3 yang menunjukkan laju kerusakan untuk tipe lokomotif CC2017706 meningkat hingga waktu ke- t yaitu 1460 hari. Grafik laju kerusakan tersebut menunjukkan adanya *trend* naik dan tidak konstan dimana laju kerusakan terus meningkat terhadap waktu. Hal ini menunjukkan bahwa komponen roda lokomotif tipe CC2017706 mengikuti *Non-Homogenous Poisson Process* (NHPP).

4.5 Model Optimasi

Pada bab ini akan dibahas analisis mengenai waktu yang tepat untuk penggantian komponen dengan meminimalkan biaya dari komponen roda lokomotif.

Terdapat biaya yang perlu diketahui untuk menghitung model *replacement* yaitu biaya c_p yang merupakan rata-rata biaya perbaikan minimal atau penggantian secara terencana (*preventive*

maintenance) dan c_f yaitu rata-rata biaya penggantian yang terjadi jika komponen yang mengalami kerusakan (*Cost of Failure*).



Gambar 4.3 Rate of Occurance of Failure (ROCOF) dari Roda Lokomotif CC2017706

Rata-rata biaya *cost of preventive* berdasarkan informasi yang diperoleh adalah biaya *maintenance* mesin yang dibutuhkan untuk sekali *maintenance* adalah sebesar Rp. 711.550,-. Berdasarkan informasi yang diperoleh dari Dipo Lokomotif Sidotopo rincian biaya untuk proses pembubutan yang diakibatkan karena kerusakan pada roda lokomotif atau dikarenakan keausan pada roda sehingga diameter roda berkurang disajikan dalam Tabel 4.7 berikut.

Tabel 4.7 Nilai c_f (*Cost of Preventive*)

C_p (<i>Cost of Preventive</i>) / Component	
Labour	Rp. 301.000,-
Over head cost	Rp. 172.000,-
Listrik	Rp. 81.300,-
Pahat Bubut	Rp. 53,250,-
Maintenance Mesin	Rp. 104.000,-
C_p	Rp. 711.550,-

Biaya untuk *labour* sebesar Rp. 301.000,- untuk dua *labour*, selain itu ada biaya *over head cost* atau uang lembur untuk dua orang *labour* sehingga totalnya sebesar Rp.172.000,-. Pembubutan yang dilakukan memerlukan alat pahat bubut dengan biaya Rp.53.250 per komponen roda, untuk listrik sebesar Rp.81.300,- dan untuk biaya *maintenance* mesin adalah biaya seperti penggantian oli dsb yaitu sebesar Rp. 104.000,-. Jika komponen roda mengalami proses perbaikan terencana maka total biaya minimal yang akan dikeluarkan adalah sebesar Rp.711.550,- per komponen roda.

Berdasarkan informasi yang diperoleh dari PT. Kereta Api Indonesia (Persero) estimasi nilai biaya yang dikeluarkan pada saat komponen roda mengalami penggantian (*Cost of Failure*) adalah sebesar Rp.7000.000,- yaitu biaya pembelian untuk satu komponen roda dan biaya untuk pemasangannya. Biaya tersebut merupakan biaya yang dikeluarkan untuk penggantian roda lama menjadi roda baru dikarenakan roda lama sudah tidak layak digunakan dengan biaya sebesar Rp. 7.000.000,- per komponen.

Nilai c_p dan c_f ini akan digunakan untuk menghitung persamaan berikut.

$$C(T;n) = \frac{7000000 \left[n - \sum_{j=0}^{n-1} (n-j) \frac{[W(T)]^j}{j!} e^{-W(T)} \right] + 711550}{\sum_{j=0}^{n-1} \int_0^T \frac{[W(t)]^j}{j!} e^{-W(t)} dt}$$

Untuk mendapatkan nilai fungsi biaya yang minimum dari $C(T;n)$ maka terlebih dahulu akan dicari nilai dari laju kerusakan terhadap waktu dengan mensubstitusikan nilai parameter β dan λ kedalam persamaan. Langkah selanjutnya adalah memilih pasangan T dan N yang akan dihitung dengan mensubstitusikan nilai c_f dan c_p kedalam persamaan yang telah dijabarkan.

Untuk mendapatkan nilai fungsi biaya yang minimum dari $C(T;n)$ maka digunakan perhitungan dengan prosedur iteratif menggunakan perhitungan integral trapesium yang ditunjukkan pada Lampiran 7 dengan menggunakan persamaan (2.16). Berikut

adalah estimasi biaya yang didapatkan pada pengamatan dengan menggunakan *time truncated* pada roda lokomotif seri CC2017706. Hasil perhitungan dari persamaan $C(T;n)$ untuk roda lokomotif CC2017706 menunjukkan nilai masing-masing biaya yang dihasilkan pada kerusakan pertama sampai kerusakan ke- T yang mengacu pada Lampiran 8 diringkas dalam Tabel 4.8.

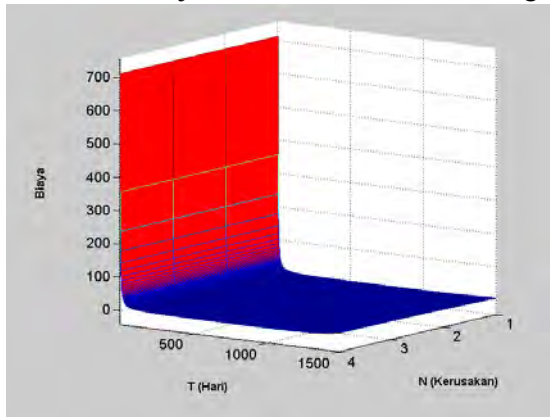
Tabel 4.8 Ekspektasi Biaya (Ribu Rupiah) untuk Penggantian Komponen Roda Lokomotif Seri CC2017706

<i>Time</i> (Day)	Kerusakan ke- N			
	1	2	3	4
100	7.1162	7.1162	7.1162	7.1162
300	2.3721	2.3721	2.3721	2.3721
500	1.4233	1.4233	1.4233	1.4233
800	0.9049	0.9048	0.9048	0.9048
923	0.8418	0.8415*)	0.8415	0.8415
1100	1.0987	1.1087	1.109	1.109
1300	2.8104	3.2326	3.3034	3.3124
1500	5.5218	8.8626	11.0604	12.2998

Berdasarkan Tabel 4.8 menunjukkan nilai estimasi biaya perbaikan komponen roda lokomotif seri CC2017706 yang menghasilkan biaya paling minimum sebesar 0.8415 yang kemudian dikonversikan dengan dikali Rp.1000,- sehingga diperoleh hasil Rp.841.5,- per komponen roda lokomotif per satu hari beroperasi. Sehingga biaya yang dikeluarkan untuk satu lokomotif adalah sebesar Rp. 10.098,- per hari. Biaya tersebut terdapat pada kerusakan kedua saat roda lokomotif beroperasi pada 923 hari. Tindakan yang perlu dilakukan berdasarkan hasil tersebut untuk komponen roda lokomotif seri CC2017706 adalah pada saat komponen sudah beroperasi selama 923 hari atau ketika komponen sudah dilakukan *preventive* sebanyak 2 kali dengan biaya penggantian komponen roda minimum sebesar Rp. 9.330.552,-.

Dari Gambar 4.4 terlihat bahwa titik yang paling minimum untuk roda lokomotif seri CC2017706 terdapat pada kerusakan kedua. Jika digambarkan dalam bentuk grafik tiga dimensi maka

hasil perhitungan biaya dari persamaan $C(T;n)$ untuk waktu ke- T dan kerusakan ke- N disajikan dalam Gambar 4.4 sebagai berikut.



Gambar 4.4 Ekspektasi Optimasi Biaya komponen Roda Lokomotif Seri CC2017706 Terhadap Sepasang T dan N

Pemilihan waktu perbaikan tergantung pada mana yang lebih dahulu terjadi, pada kerusakan kedua atau waktu hari komponen beroperasi. Dari hasil perhitungan estimasi biaya yang didapat maka untuk perbaikan untuk komponen roda lokomotif sebaiknya dilakukan setelah komponen mengalami kerusakan kedua atau pada saat komponen sudah beroperasi selama 923 hari. Nilai estimasi biaya untuk penggantian komponen yang paling minimum didapatkan sebesar Rp. 9.330.552,-.

LAMPIRAN

Lampiran 1A. Failure Truncated Data CC2017703

Kerusakan ke-N	Tanggal	Lifetime (Hari)	$X_i - X_{i-1}$ (Hari)
1	14-Aug-13	198	198
2	8-Jan-14	345	147
3	4-Jul-15	887	542

Lampiran 1B. Failure Truncated Data CC2017711

Kerusakan ke-N	Tanggal	Lifetime (Hari)	$X_i - X_{i-1}$ (Hari)
1	26-Aug-13	98	98
2	12-Nov-13	176	78
3	22-Aug-15	824	648

Lampiran 1C. Failure Truncated Data CC2017713

Kerusakan ke-N	Tanggal	Lifetime (Hari)	$X_i - X_{i-1}$ (Hari)
1	14-Mar-13	498	498
2	30-Apr-13	545	47
3	14-Nov-15	1473	928

Lampiran 1D. Failure Truncated Data CC2017718

Kerusakan ke-N	Tanggal	Lifetime (Hari)	$X_i - X_{i-1}$ (Hari)
1	21-Aug-13	446	446
2	09-Jan-14	587	141
3	26-Feb-14	635	48

Lampiran 1E. Failure Truncated Data CC2017719

Kerusakan ke-N	Tanggal	Lifetime (Hari)	$X_i - X_{i-1}$ (Hari)
1	26-Feb-13	333	333
2	01-Apr-13	367	34
3	24-Jun-13	451	84

Lampiran 1F. Failure Truncated Data CC2018348

Kerusakan ke-N	Tanggal	Lifetime (Hari)	$X_i - X_{i-1}$ (Hari)
1	17-Dec-13	292	292
2	14-Aug-15	897	605
3	29-Dec-15	1034	137

Lampiran 1G. Failure Truncated Data CC2030201

Kerusakan ke-N	Tanggal	Lifetime (Hari)	$X_i - X_{i-1}$ (Hari)
1	11-Jul-13	514	514
2	30-Jan-14	717	203
3	12-Aug-15	1276	559

Lampiran 1H. Failure Truncated Data CC2030203

Kerusakan ke-N	Tanggal	Lifetime (Hari)	$X_i - X_{i-1}$ (Hari)
1	17-Dec-12	371	371
2	1-May-13	506	135
3	13-Jun-14	914	408

Lampiran 1I. Failure Truncated Data CC20341002

Kerusakan ke-N	Tanggal	Lifetime (Hari)	$X_i - X_{i-1}$ (Hari)
1	14-Dec-12	276	276
2	21-Jun-13	465	189
3	24-Sep-13	560	95

Lampiran 2A. Time Truncated Data CC2017701

Kerusakan ke-N	Tanggal	Lifetime (Hari)	$X_i - X_{i-1}$ (Hari)
1	3-Jul-14	966	339
2	4-May-15	1271	305

Lampiran 2B. Time Truncated Data CC2017706

Kerusakan ke-N	Tanggal	Lifetime (Hari)	$X_i - X_{i-1}$ (Hari)
1	20-Nov-13	704	32
2	11-May-15	1241	537

Lampiran 2C. Time Truncated Data CC2017710

Kerusakan ke-N	Tanggal	Lifetime (Hari)	$X_i - X_{i-1}$ (Hari)
1	20-Dec-12	570	570
2	31-Jan-13	612	42
3	23-Jul-13	785	173
4	27-May-14	1093	308

Lampiran 2D. Time Truncated Data CC2030202

Kerusakan ke-N	Tanggal	Lifetime (Hari)	$X_i - X_{i-1}$ (Hari)
1	19-Feb-13	372	372
2	19-Jun-13	492	120
3	26-Sep-13	591	99
4	21-Oct-14	981	390

Lampiran 2E. Time Truncated Data CC2040307

Kerusakan ke-N	Tanggal	Lifetime (Hari)	$X_i - X_{i-1}$ (Hari)
1	5-Jun-13	371	371
2	8-Aug-13	435	64
3	17-Oct-13	505	70
4	22-Nov-15	1271	766

Lampiran 3A. Syntax MATLAB untuk Perhitungan Statistik Uji (L) *Failure Truncated Data*

```

clc;
x=input('x=');
N=length(x);
a=0;
for i=1:N-1
a=a+x(i);
at=a/(N-1);
end
b=x(N,+)/2;
c=x(N,+)/sqrt(12*(N-1));
L=(at-b)/c;
L

```

Lampiran 3B. Syntax MATLAB untuk Perhitungan Statistik Uji (L) *Time Truncated Data*

```

clc;
x=input('x=');
T=input('T=')
N=length(x);
for i=1:N
a=(sum(x)/N)-(T/2);
b=T/(sqrt(12*N));
L=a/b;
end
L

```

Lampiran 4. Perhitungan Estimasi Parameter Menggunakan *Maximum Likelihood Estimation* (MLE) untuk Data *Time Truncated* pada Komponen Roda Lokomotif Seri CC2017706

i	$\frac{T}{T_i}$	$\ln\left(\frac{T}{T_i}\right)$
1	1.1765	0.1625
2	1.00829	0.00825

Parameter β didapat hasil sebagai berikut.

$$\hat{\beta} = \frac{N}{\sum_{i=1}^N \ln\left(\frac{T}{T_i}\right)} = \frac{2}{0.17077} = 11.712$$

Parameter λ didapat hasil sebagai berikut.

$$\lambda = \frac{T}{N^{\frac{1}{\beta}}} = \frac{1460}{2^{\frac{1}{11.712}}} = 1376.097$$

Lampiran 5. Perhitungan *Cramer-von Mises Test* untuk Data *Time Truncated* pada Komponen Roda Lokomotif Seri CC2017706

Perhitungan *conditional* MLE dari β

$$\tilde{\beta} = \frac{N}{\sum_{i=1}^N \ln \frac{Y}{Y_i}} = \frac{2}{0.1708} = 11.712$$

Perhitungan *unbiased conditional* MLE dari β

$$\bar{\beta} = \frac{N-1}{N} \tilde{\beta} = \frac{2-1}{1} (11.712) = 11.712$$

Perhitungan statistik uji metode *Cramer-von Mises*

i	T_i	\hat{R}_i	$\frac{2i-1}{2(n-1)}$	$\left(\hat{R}_i - \frac{2i-1}{2(n-1)} \right)^2$
1	1241	0.3869	0.25	0.01852
2	1448	0.9528	0.75	0.04114

$$C_R^2 = \frac{1}{12(n-1)} + \sum_{i=1}^{n-1} \left(\hat{R}_i - \frac{2i-1}{2(n-1)} \right)^2 = \frac{1}{12(2-1)} + 0.0596 = 0.143$$

Lampiran 6. Perhitungan *Rate of Occurance of Failure* (ROCOF) pada Komponen Roda Lokomotif Seri CC2017706

$$w(t) = \frac{\beta}{\lambda} \left(\frac{t}{\lambda} \right)^{\beta-1} = \frac{11.712}{1376.097} \left(\frac{T}{1376.097} \right)^{11.712-1}$$

Dari persamaan diatas didapatkan hasil sebagai berikut.

T	ROCOF	T	ROCOF	T	ROCOF
1000	0.000278	1023	0.000355	1046	0.000451
1001	0.000281	1024	0.000359	1047	0.000455
1002	0.000284	1025	0.000363	1048	0.00046
1003	0.000288	1026	0.000367	1049	0.000465
1004	0.000291	1027	0.00037	1050	0.00047
1005	0.000294	1028	0.000374	1051	0.000474
1006	0.000297	1029	0.000378	1052	0.000479
1007	0.0003	1030	0.000382	1053	0.000484
1008	0.000303	1031	0.000386	1054	0.000489
1009	0.000307	1032	0.00039	1055	0.000494
1010	0.00031	1033	0.000394	1056	0.000499
1011	0.000313	1034	0.000398	1057	0.000504
1012	0.000316	1035	0.000403	1058	0.000509
1013	0.00032	1036	0.000407	1059	0.000515
1014	0.000323	1037	0.000411	1060	0.00052
1015	0.000327	1038	0.000415	1061	0.000525
1016	0.00033	1039	0.00042	1062	0.00053
1017	0.000334	1040	0.000424	1063	0.000536
1018	0.000337	1041	0.000428	1064	0.000541
1019	0.000341	1042	0.000433	1065	0.000547
1020	0.000344	1043	0.000437	.	.
1021	0.000348	1044	0.000442	.	.
1022	0.000352	1045	0.000446	.	.

Lampiran 7. Syntax MATLAB Optimasi Biaya Komponen Roda Lokomotif Seri CC2017706

```

Lambda=input('lambda=');
Beta=input('beta=');
Cf=7028.037
Cp=493.692
N=1:1:4;
T=1:1:1500;
T1=length(T);
N1=length(N);
For a=1:T1
T=T(a);
For b=1:N1
n=N(b);
Rt=(t/Lambda).^Beta;
at=0;
bw=0;
for i=0:(b-1)
at=at+((b-i)*((Rt^i)/factorial(i))*exp(-1*Rt));
q=0;
c=0;
h=(t-0)/10000;
Luas=0;
for p=1:(10000-1)
ba((((c/Lambda).^Beta)^i)./factorial(i))*exp(-(c/Lambda).^Beta);
d=c+h;
bb((((d/Lambda).^Beta)^i)./factorial(i))*exp(-(d/Lambda).^Beta);
Luas=Luas+(0.5*(ba+bb)*h);
c=d;
end
bw=bw+Luas
end
C(a,b)=((Cf*(n-at))+Cp)/bw
end
end
mesh(C)

```

Lampiran 8. Hasil Perhitungan Optimasi Biaya Komponen Roda Lokomotif Seri CC2017706

<i>Time (Day)</i>	Kerusakan ke- <i>N</i>					
	1	2	3	4	5	6
1	711.6212	711.6212	711.6212	711.6212	711.6212	711.6212
2	355.8106	355.8106	355.8106	355.8106	355.8106	355.8106
3	237.2071	237.2071	237.2071	237.2071	237.2071	237.2071
4	177.9053	177.9053	177.9053	177.9053	177.9053	177.9053
56	142.3242	142.3242	142.3242	142.3242	142.3242	142.3242
7	118.6035	118.6035	118.6035	118.6035	118.6035	118.6035
8	101.6602	101.6602	101.6602	101.6602	101.6602	101.6602
9	88.9526	88.9526	88.9526	88.9526	88.9526	88.9526
10	79.069	79.069	79.069	79.069	79.069	79.069
11	71.1621	71.1621	71.1621	71.1621	71.1621	71.1621
.
.
.
920	0.8419	0.8416	0.8416	0.8416	0.8419	0.8416
921	0.8419	0.8416	0.8416	0.8416	0.8419	0.8416
922	0.8419	0.8416	0.8416	0.8416	0.8419	0.8416
923	0.8418	0.8415	0.8415	0.8415	0.8418	0.8415
924	0.8418	0.8415	0.8415	0.8415	0.8418	0.8415
925	0.8418	0.8415	0.8415	0.8415	0.8418	0.8415
926	0.8418	0.8415	0.8415	0.8415	0.8418	0.8415
927	0.8418	0.8416	0.8416	0.8416	0.8418	0.8416
928	0.8419	0.8416	0.8416	0.8416	0.8419	0.8416
929	0.8419	0.8416	0.8416	0.8416	0.8419	0.8416
.
.
.
1498	5.5075	8.8143	10.9704	12.1693	5.5075	8.8143
1499	5.5147	8.8386	11.0165	12.2346	5.5147	8.8386
1500	5.5218	8.8626	11.0624	12.2998	5.5218	8.8626

BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan pengujian-pengujian dan hasil perhitungan yang telah dilakukan maka diperoleh kesimpulan untuk tindakan penggantian sebaiknya komponen roda lokomotif seri CC2017706 dilakukan pada saat komponen roda telah beroperasi selama 923 hari atau setelah dilakukan 2 kali *preventive*. Nilai estimasi biaya yang minimum didapatkan hasil sebesar Rp.10.098,- per lokomotif untuk satu hari lokomotif beroperasi. Hal ini menunjukkan bahwa biaya minimal penggantian roda berdasarkan waktu optimal yaitu ketika komponen roda telah beroperasi selama 923 hari setara dengan 3 tahun atau setelah dilakukan 2 kali *preventive* sebesar Rp.9.330.552,-.

5.2 Saran

Saran yang dapat diberikan berdasarkan hasil analisis dalam penelitian ini adalah sebagai berikut.

1. Data yang digunakan dalam penelitian kali ini sangat sedikit maka diharapkan dalam penelitian selanjutnya dapat digunakan data yang lebih banyak.
2. Untuk penelitian selanjutnya pada pengujian *trend* pengamatan *failure truncated* dan *time truncated data* jika diperoleh kesimpulan mengikuti *Homogenous Poisson Process* (HPP) maka digunakan estimasi menggunakan metode *Bayesian*.

DAFTAR PUSTAKA

- Anderson, T. W, & Darling, D. 1954. A Test of Goodness-of-Fit. *Journal of the America*, 765-769.
- Crowder, M. J., Kimber, A. C., Smith, R. L., & Sweeting, T. J. 1991. *Statistical Analysis of Reliability Data*. Springer Science Business Media.
- Crow, L. H. 1990. Evaluating the Reliability of Repairable Systems. *Annual Reliability and Maintainability Symposium*, 275-279.
- Hartono, A.S, MM. 2012. Lokomotif dan Kereta Diesel di Indonesia Edisi 3. PT. Ilalang Sakti Komunikasi.
- Hoyland, A. and Rausand, M. 1994. *System Reliability Theory*. New York: John Wiley & Sons.
- Kenneth, J. R, Michael, S. H, C. Shane, R., 2011. A Bayessian Hierarchial Power Law Process Model for Multiple Repaireable System with an Application to Supercomputer Reliability. *Journal of Quality Technology*, 209-233.
- Krisnadi, J.W, Soemadi, K., Mustofa, F.H. 2014. Optimasi Waktu Penggantian Komponen pada Lokomotif DE CC 201 Seri 99 Menggunakan Metode *Age Replacement* di PT. Kereta Api Indonesia. Teknik Industri Itenas No. 04 Vol. 01.
- Kvam, P.H., dan Vidakovic, B. 2007. *Nonparametric statistics with Application to Science and Engineering*. United States of America: Wiley-Interscience-A John Wiley & Sons, INC., Publication
- Lehman, E. L. 1975. *Applied Probability Models with Optimization Applications*. San Fransisco: Holden-Day.
- Leung, F. K. N, & Cheng A. L. M. 2000. Determining Replacement Policies for Bus Engines. *International Journal of Quality and Reliability Management*, 176-182.

- Noorahma. 2015. Penentuan Kebijakan Penggantian Komponen *Heat Exchanger* (HE) Pesawat Boeing 737-800 Menggunakan Metode *Power Law Process* di PT. Garuda Miantenance Facility (GMF) *Aero Asia*. Tugas Akhir Statistika, Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya.
- O'Connor, P. 2012. *Practical Reliability Engineering*. New York: John Wiley & Sons.
- Pan, R. and Ridgon, S. E. 2009. Bayes Inference for General Repairable Systems. *Journal of Quality Technology*, 82–94.
- Reese, C. S.; Wilson, A. G.; Guo, J; Hamada, M. S.; and Johnson, V. E. (2011). A Bayesian Model for Integrating Multiple Sources of Lifetime Information in System Reliability Assessments. *Journal of Quality Technology*, 127-141.
- Ridgon, S. E., & Basu, A.P. 2000. *Statistical Method for The Reliability of Repairable Systems*. New York: John Wiley & Sons.
- Yang, G. 2007. *Life Cycle Reliability Engineering*. New York: John Wiley & Sons.

BIOGRAFI PENULIS



Penulis memiliki nama lengkap Sinta Septi Pangastuti lahir di Magetan, 22 September 1993 yang merupakan anak pertama dari 1 bersaudara. Penulis menempuh pendidikan formal di SDN Parang 1, SMPN 1 Magetan, SMAN 2 Magetan. Pada tahun 2011 lulus dari SMAN 2 Magetan dan diterima melalui jalur reguler D3 Jurusan Statistika FMIPA ITS, kemudian melanjutkan Lintas Jalur

(LJ) S1 dengan jurusan yang sama selama 2 tahun yang terdaftar sebagai mahasiswa ITS dengan NRP 1314105011. Penulis lulus S1 dengan Tugas Akhirnya yang berjudul **“Optimasi Waktu Penggantian Komponen Roda Lokomotif Seri CC di Dipo Lokomotif Sidotopodo PT. Kereta Api Indonesia (Persero) dengan Metode *Power Law Process*”**. Selama menempuh bangku perkuliahan, penulis memberikan les privat kepada anak SD untuk semua mata pelajaran selain itu pernah menjadi asisten dosen untuk mata kuliah Analisis Data Kualitatif. Pada tahun 2015 penulis pernah melakukan kerja praktek di Perusahaan Daerah Air Minum (PDAM) Surya Sembada Surabaya. Akhir kata apabila pembaca memiliki saran, kritik, dan masukan mengenai tugas akhir dapat menghubungi melalui email ke sintaseptip@gmail.com.